

0 784023

На правах рукописи



АЛХАМАД АДНАН

**АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ АЛГОРИТМОВ  
ОБРАБОТКИ И ПОИСКА ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ  
НА ФОНЕ НЕГАУССОВСКИХ ПОМЕХ**

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ 05.12.13 - Системы, сети и устройства  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань 2010

**Работа выполнена на кафедре радиоэлектронных и телекоммуникационных систем Казанского государственного технического университета им. А.Н.Туполева.**

**Научный руководитель**

доктор физ.-мат. наук, профессор  
Надеев Аделъ Фирадович,  
Казанский государственный технический  
университет им.А.Н.Туполева, г.Казань

**Официальные оппоненты**

доктор физ.-мат. наук, профессор  
Карпов Аркадий Васильевич,  
Казанский государственный университет,  
г.Казань

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000727817

доктор технических наук, профессор  
Султанов Альберт Ханович,  
Уфимский государственный авиационный  
технический университет, г.Уфа

**Ведущая организация**

Ижевский государственный технический  
университет, г.Ижевск

Защита диссертации состоится "24" 09 2010 г. в 14 часов на заседании диссертационного Совета Д212.079.03 в Казанском государственном техническом университете им. А.Н.Туполева по адресу: 420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д.31, ауд. 504.

Ваши отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим выслать по адресу: 420111, Казань, ул. К. Маркса, д. 10, на имя ученого секретаря.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного технического университета имени А.Н.Туполева, с авторефератом – на сайте КГТУ им. А.Н. Туполева: [http:// www.kai.ru](http://www.kai.ru).

Автореферат разослан " 21 " 08 \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, профессор

Г.И. Щербаков

**Актуальность темы.** Широкий класс современных и перспективных активно развивающихся беспроводных телекоммуникационных технологий базируется на использовании широкополосных сигналов основанных на прямом расширении спектра (DS/SS - Direct Sequence Spread Spectrum). Функционирование широкополосных телекоммуникационных систем основанных на DS/SS -сигналах требует обеспечения синхронизации приемных трактов на основе использования специальных синхросигналов и соответствующих методов их обработки.

Важным первичным этапом обработки синхросигналов, существенно определяющим соответствующие вероятностно-временные системные характеристики является поиск синхросигналов. В настоящее время разработано большое количество различных методов поиска синхросигналов, при этом основные усилия сосредоточены в области разработки новых стратегий поиска, типов синхропоследовательностей. В подавляющем большинстве в качестве базовой процедуры обнаружения синхропоследовательности используется линейная корреляционная обработка.

Важным и плодотворным направлением научно-технического прогресса в области теории и проектирования телекоммуникационных, радиотехнических систем различного назначения является разработка новых методов обработки сигналов. Условия функционирования реальных телекоммуникационных систем характеризуются совместным возмущающим воздействием дестабилизирующих факторов и комплекса разнородных помех. Это обуславливает стохастический характер сигналов и помех, представляющих собой случайные процессы со сложными нестандартными законами распределений.

В настоящее время стремительный прогресс в области микроэлектроники, программируемых вычислительных структур, информационных технологий закладывает качественно новый базис, обеспечивающий возможность реализации сложных оптимальных алгоритмов обработки сигналов. Корреляционная теория оптимального приема, нашедшая широкое применение при ограниченных возможностях аналоговой и относительно простой реализации алгоритмов обработки, становится недостаточной, чтобы полноценно использовать потенциальные возможности новых микроэлектронных и информационных технологий.

В современных условиях ограничение только классом стандартных нормальных распределений является сдерживающим развитие алгоритмического обеспечения современных телекоммуникационных систем. Поэтому в настоящее время достаточно активно ведутся работы по поиску новых вероятностных моделей представления реальных случайных сигналов и помех, а также соответствующих методов анализа и синтеза. В частности, предлагаются модели на основе распределений Вейбула, Накагами, логарифмически нормального, гамма-распределения, распределений Пирсона и других. Ука-





Поставленная цель достигается решением следующих **частных задач**:

- Обзор существующих методов обработки и поиска широкополосных сигналов в негауссовских каналах связи, моделей описания негауссовских помех;
- Синтез помехоустойчивых алгоритмов обработки и поиска широкополосных сигналов на фоне негауссовских помех;
- Разработка адекватного задаче поиска сигналов метода приближенного анализа вероятностных характеристик алгоритмов обработки широкополосных сигналов в негауссовских каналах;
- Анализ и синтез помехоустойчивого алгоритма поиска широкополосных сигналов на фоне негауссовских помех;
- Разработка компьютерных программ по моделированию и расчету характеристик алгоритмов обработки и поиска широкополосных сигналов на фоне негауссовских помех;
- Разработка рекомендаций по практической реализации разработанных алгоритмов обработки и поиска широкополосных сигналов.

**Методы исследований.** Для решения указанных задач используются аналитические методы теории вероятности и математической статистики, теории статистических решений, статистической теории связи, теории графов, теории полигауссовых случайных явлений, статистическое моделирование на ЭВМ. Экспериментальные исследования проведены с использованием разработанного программного обеспечения на основе программных средств MATLAB, MATLAB Simulink.

**Достоверность и обоснованность** результатов обусловлена корректным использованием существующего и разработанного математического аппарата, методов статистического анализа и подтверждается соответствием результатов компьютерного моделирования полученным в диссертации теоретическим положениям.

**Научная новизна** полученных результатов:

- Разработан метод приближенного определения параметров результирующего полилогнормального распределения решающей статистики полигауссовых алгоритмов обработки сигналов;
- Получены замкнутые выражения для оценки вероятности ошибки полигауссового алгоритма различения сигналов известной формы на фоне негауссовских помех;
- Получены замкнутые выражения для оценки вероятностных характеристик полигауссового алгоритма обнаружения сигналов со случайной начальной фазой на фоне негауссовских помех;
- Разработан алгоритм поиска широкополосных сигналов на фоне негауссовских помех, осуществлен анализ эффективности и синтез пара-

метров алгоритма по критерию минимума времени поиска при фиксированной вероятности успешного завершения поиска.

**Практическая ценность работы** состоит в следующем:

- Разработаны инженерные методики расчетов вероятности ошибки полигауссовых алгоритмов различения сигналов известной формы и обнаружения сигналов со случайной начальной фазой, позволяющие осуществлять оценку помехоустойчивости при действии негауссовских помех;
- Разработан алгоритм и структура устройства поиска синхросигналов на фоне негауссовских помех, осуществлена условная оптимизация параметров алгоритма по критерию минимума времени поиска при фиксированной вероятности успешного завершения поиска обеспечивающая улучшение системотехнических характеристик беспроводных телекоммуникационных систем;
- Создано программное обеспечение для проведения исследований характеристик алгоритмов обработки широкополосных сигналов на фоне негауссовских помех, являющееся удобным инструментальным средством для повышения эффективности работы разработчиков аппаратуры беспроводных телекоммуникационных систем и радиотехнических систем;
- Разработаны технические решения и рекомендации по практической реализации полученных алгоритмов поиска широкополосных сигналов на фоне негауссовских помех.

**Материалы диссертации прошли апробацию** на следующих научно-технических конференциях и семинарах: Международная научно-техническая конференция “Радиолокация, навигация, связь” (Воронеж, 2009, 2010 г.г.); Десятая Международная научно-технической конференция «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» (Самара, 2009), VI Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем» (Ульяновск, 2009), Международная НТК «Системные проблемы надежности, качества, математического моделирования информационных технологий в инновационных проектах» (Сочи, 2009 г.), VII Всероссийская научно-техническая конференция «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (Чебоксары, 2010), Международная НТК «ТрансТелеКом-2010» (Ростов, 2010).

**Публикации.** Включенные в диссертацию основные научные результаты опубликованы в 14 печатных работах, в том числе в 5 статьях в журналах из Перечня ВАК.

**Использование результатов диссертации и пути дальнейшей реализации.** Теоретические и практические результаты, полученные в диссер-

тационной работе, внедрены в учебный процесс по направлению 210400-«Телекоммуникации» и специальностям 210404-«Многоканальные телекоммуникационные системы» и 210402-«Средства связи с подвижными объектами» в Казанском государственном техническом университете им. А.Н.Туполева.

**На защиту выносятся следующие основные положения:**

- Метод приближенного анализа распределений решающей статистики полигауссовых алгоритмов обработки, адекватный задачам поиска сигналов;
- Методика аналитической оценки вероятности ошибки полигауссового алгоритма различения сигналов известной формы на фоне негауссовских помех;
- Методика аналитической оценки вероятностных характеристик полигауссового алгоритма обнаружения сигналов со случайной начальной фазой на фоне негауссовских помех;
- Алгоритм поиска широкополосных сигналов на фоне негауссовских помех, результаты анализа его эффективности и синтеза параметров алгоритма по критерию минимума времени поиска при фиксированной вероятности успешного завершения поиска.

**Сведения о личном вкладе автора.** Автором сформулирована проблема, поставлены задачи, обеспечивающие ее решение, получены и обоснованы новые научные результаты, сформулированы основные положения, выводы и рекомендации защищаемой работы. Работы, выполненные в соавторстве, объединены общим научным направлением, предложенным соискателем. Соискателем разработано оригинальное программное обеспечение для проведения расчетов и имитационного моделирования.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, включающего в себя 96 наименований отечественных и зарубежных источников, в том числе 14 работ автора, приложения и содержит 136 страниц машинописного текста.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

***Во введении*** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель работы, решаемые задачи, перечислены основные положения, выносимые на защиту. Приведена структура диссертации, форма апробации и внедрения ее результатов.

***В главе 1-*** «Постановка задач анализа и синтеза помехоустойчивых алгоритмов поиска широкополосных сигналов на фоне негауссовских помех» проведен анализ состояния и тенденций развития современных беспроводных телекоммуникационных систем и рассмотрены объективные условия и

особенности их функционирования, анализируются факторы, ухудшающие работу данного класса систем.

Важным первичным этапом обработки синхросигналов, существенно определяющим соответствующие вероятностно-временные системные характеристики является поиск синхросигналов. Проведен анализ современного состояния проблемы поиска синхросигналов, рассмотрена классификация соответствующих методов. Классификация методов поиска в общем случае включает тип используемого обнаружителя синхросигнала и стратегию поиска. Активно развиваются новые направления, основанные на совершенствовании стратегий поиска. Между тем в качестве базовых процедур обнаружения синхропоследовательности используется линейная корреляционная обработка, известные критерии оптимальности, такие как критерии Байеса, максимума правдоподобия, Неймана-Пирсона.

Объективно сложный негауссовский характер сигналов и помех в реальных радиоканалах обуславливает то, что корреляционные методы не позволяют достигнуть потенциальной помехоустойчивости, что, как следствие, ограничивает такие системные характеристики как пропускная способность, емкость, эффективность использования частотного диапазона. В настоящее время потенциальные возможности корреляционных методов практически исчерпаны, при этом важным направлением развития является выход на новый «посткорреляционный» уровень моделей и методов определяющих методологический базис алгоритмического обеспечения радиointерфейсов перспективных беспроводных телекоммуникационных систем.

Таким образом, конструктивным направлением повышения эффективности использования частотного ресурса является оптимизация процедур обработки сигналов на основе использования «посткорреляционных» моделей и соответствующих методов, позволяющих оптимальным образом учесть специфику сигнально-помехового комплекса в негауссовских радиоканалах реальных систем. Актуальность данного направления на современном этапе обусловлена, в том числе, стремительным развитием микроэлектронных технологий, элементной базы и программно-аппаратных средств обработки сигналов, позволяющих в реальном масштабе времени реализовывать все более сложные процедуры обработки сигналов.

**В главе 2** «Разработка приближенных методов анализа вероятностных характеристик полигауссового алгоритма обработки широкополосных сигналов на фоне негауссовских помех» разработан приближенный метод анализа распределений решающей статистики полигауссовых алгоритмов приема, осуществлен анализ вероятностных характеристик алгоритма различения сигналов известной формы на фоне негауссовских помех. Решена задача анализа вероятностных характеристик алгоритма обнаружение сигналов со случайной начальной фазой на фоне негауссовских помех.

Рассмотрена задача различения двух сигналов (проверки гипотез  $H_i$ ,  $i = \overline{0,1}$ ) известной формы вида:

$$H_i: u(t) = s_i(t) + n(t), \quad 0 \leq t \leq T, \quad i = \overline{0,1}, \quad (1)$$

на фоне негауссовской помехи, предоставленной полигауссовым распределением:

$$w_p(u) = \sum_{n=1}^N q_n \cdot N(u, m_n, \sigma_n), \quad \sum_{n=1}^N q_n = 1, \quad (2)$$

в случае цифрового предоставления обрабатываемых сигналов:

$$H_i: u_k = s_{i,k} + n_k, \quad 1 \leq k \leq K, \quad i = \overline{0,1}. \quad (3)$$

В соответствии с байесовским критерием оптимальный алгоритм различения имеет следующий вид

$$L(\bar{u}) = \frac{\sum_{n=1}^N \exp(X_{i,n})}{\sum_{n=1}^N \exp(X_{0,n})} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \hat{\lambda}, \quad (4)$$

$$X_{i,n} = -\frac{1}{2\sigma_n^2} \sum_{k=1}^K U_{i,n,k}^2 + \ln(q_n) - K \cdot \ln(\sigma_n), \quad (5)$$

$$U_{i,n,k} = u_k - s_{i,k} - m_n.$$

где:  $\bar{u} = \{u_k, \quad k = \overline{1, K}\}$  - вектор отсчетов входного сигнала.

Рассмотрена задача анализа эффективности алгоритма (4)-(5). Разработан метод приближенного анализа распределения решающей статистики вида (4) полигауссовых алгоритмов. Найдены условные распределения решающей статистики  $L(\bar{u})$  в случае действия одной из гауссовских компонент в распределении помехи с номером  $m$  (гипотеза  $W_m$ ):  $w_m(x) = N(x, m_m, \sigma_m)$ , и наличии сигнала  $s_j$  (гипотеза  $H_j$ ). В результате получено, что условное распределение решающей статистики может быть представлено в виде логнормального распределения:

$$w_{\Lambda|H_j, W_m}(l|H_j, W_m) = \text{LogNormal}(l, \mu d^{j,m}, \nu d^{j,m}), \quad (6)$$

с определенными параметрами  $\mu d^{j,m}, \nu d^{j,m}$  для которых получены соответствующие выражения.

Усредняя (6) по гауссовским компонентам помехового распределения (2) получены результирующие распределения решающей статистики в виде полилогнормальных распределений:

$$w_{\Lambda|H_j}(l|H_j) = \sum_{m=1}^N q_m \cdot \text{LogNormal}(l, \mu d^{j,m}, \nu d^{j,m}), \quad j = \overline{0,1}. \quad (7)$$

На основе полученных выражений для распределения решающей статистики, решена задача анализа алгоритма различения и найдены выражения для оценки вероятности ошибок первого и второго рода:

$$P_M = P(\Lambda(\bar{u}) < \lambda | H_1) = \int_{-\infty}^{\lambda} w_{\Lambda|H_1}(x|H_1) dx = \sum_{m=1}^N q_m \cdot \left[ 1 - Q\left(\frac{\ln(\lambda) - \mu d^{1,m}}{\sqrt{v d^{1,m}}}\right) \right], \quad (8)$$

$$P_F = P(\Lambda(\bar{u}) > \lambda | H_0) = \int_{\lambda}^{+\infty} w_{\Lambda|H_0}(x|H_0) dx = \sum_{m=1}^N q_m \cdot Q\left(\frac{\ln(\lambda) - \mu d^{0,m}}{\sqrt{v d^{0,m}}}\right), \quad (9)$$

где:

$$Q(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\alpha}^{+\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx.$$

Полная вероятность ошибки:

$$P_E = P(H_1)P_M + P(H_0)P_F, \quad (10)$$

Для проверки достоверности полученных выражений проведены соответствующие расчеты вероятностных характеристик и компьютерное моделирование алгоритма (4)-(5), результаты которых представлены на рис.1-3. На рис.1 представлено сравнение результатов расчета вероятности полной ошибки по полученной формуле (19) и компьютерного моделирования. Анализ показывает высокую степень соответствия результатов расчета и компьютерного моделирования.

На рис.2а представлены сравнительный анализ зависимости вероятности полной ошибки полигауссового и корреляционного алгоритмов приема сигналов от отношения сигнал/помеха полученной в результате расчета по формуле (19), на рис.2б аналогичные зависимости, полученные в результате компьютерного моделирования.

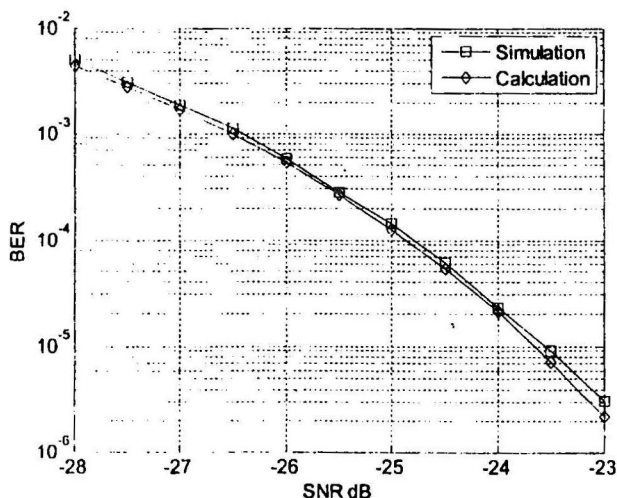


Рис.1. Зависимость вероятности полной ошибки полигауссового алгоритма различения от отношения сигнал/помеха

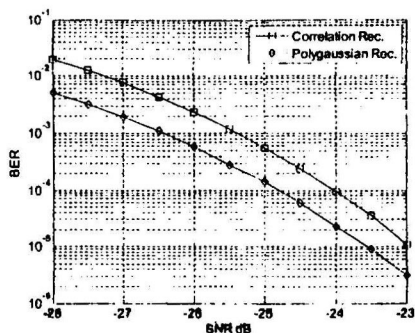
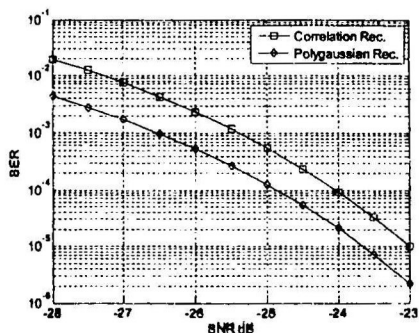


Рис.2. Вероятность полной ошибки корреляционного и полигауссового алгоритмов различия сигналов:  
 а-получена в результате расчета;  
 б-получена в результате компьютерного моделирования

Из графиков видно, что полигауссов алгоритм обеспечивает существенный выигрыш по вероятности полной ошибки по отношению к корреляционному алгоритму приема при действии негауссовских помех.

Рассмотрена задача синтеза помехоустойчивого алгоритма обнаружения широкополосного сигнала со случайной начальной фазой:

$$\begin{aligned} H_1: u(t) &= s_1(t, \theta) + n(t) \\ H_0: u(t) &= n(t) \end{aligned}, \quad 0 \leq t \leq T \quad (11)$$

где:

$$\begin{aligned} s_1(t, \theta) &= C(t) \cos(\omega t + \theta), \\ w_\theta(\theta) &= \begin{cases} \frac{1}{2\pi}, & \theta \in [-\pi, \pi], \\ 0, & \theta \notin [-\pi, \pi] \end{cases} \end{aligned}$$

на фоне негауссовской помехи, представленной полигауссовым распределением (2).

Получено выражение для решающей статистики в виде:

$$L(\bar{u}) = \frac{\sum_{n=1}^N \exp(X_{1,n})}{\sum_{n=1}^N \exp(X_{0,n})} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \lambda, \quad (12)$$

где:

$$X_{1,n} = F_n + R_n + b_{1,n}, \quad (13)$$

$$X_{0,n} = F_n + b_{0,n},$$

$$F_n = -\frac{1}{2\sigma_n^2} \sum_{k=1}^K U_{n,k}^2, U_{n,k} = u_k - m_n, \quad (14)$$

$$R_n = \log \left( I_0 \left( \frac{1}{\sigma_n^2} \sqrt{U_{c,n}^2 + U_{s,n}^2} \right) \right), \quad (15)$$

$$U_{c,n} = \sum_{k=1}^K (u_k - m_n) C_k \cos(\omega t_k), \quad (16)$$

$$U_{s,n} = \sum_{k=1}^K (u_k - m_n) C_k \sin(\omega t_k), \quad (17)$$

$$h_n = -\frac{E_c}{2\sigma_n^2} + \ln(q_n) - K \cdot \ln(\sigma_n), E_c = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K C_k^2, \quad (18)$$

$$h_{0,n} = \ln(q_n) - K \cdot \ln(\sigma_n). \quad (19)$$

Разработанная методика позволяет оценить вероятностных характеристик полигауссовского алгоритма обнаружения сигналов со случайной начальной фазой на фоне негауссовских помех. Определены моменты статистики  $X_{12}$ :

$$E[X_{12}^{j,m}] = E[X_{12}|H_1, W_m] = \mu f_n^{j,m} + i \cdot (\mu f_n^{j,m} + \delta_{1,2}), \quad (20)$$

$$E[X_{12}^{j,m}] = \text{var}(X_{12}|H_1, W_m) = \nu f_n^{j,m} + i \cdot (\nu f_n^{j,m} + 2 \cdot \text{crf}_{n,n}^{j,m}), \quad (21)$$

$$E[X_{12,n1,n2}^{j,m}] = \text{cov}(X_{12,n1}, X_{12,n2}|H_1, W_m) = \text{cf}_{n1,n2}^{j,m} + i1 \cdot \text{crf}_{n1,n2}^{j,m} + i2 \cdot \text{crf}_{n2,n1}^{j,m} + i1 \cdot i2 \cdot \text{cr}_{n1,n2}^{j,m}, \quad (22)$$

$$h_{1,n} = -i \frac{E_c}{2\sigma_n^2} + \ln(q_n) - K \cdot \ln(\sigma_n), \quad (23)$$

и на основе разработанного метода анализа распределения решающей статистики вида (4) получены распределения решающей статистики в виде полилогнормальных распределений с определенными параметрами  $\mu d_r^{j,m}, \nu d_r^{j,m}$ :

$$w_{\Lambda|H_1}(l|H_1) = \sum_{m=1}^N q_m \cdot \text{LogNormal}(l, \mu d_r^{j,m}, \nu d_r^{j,m}). \quad (24)$$

Аналогично (8)-(9) определены выражения для вероятностных характеристик полигауссовского алгоритма обнаружения сигналов со случайной начальной фазой (12)-(19) на фоне негауссовских помех.

Для проверки достоверности полученных выражений проведены соответствующие расчеты вероятностных характеристик и компьютерное моделирование алгоритма (12)-(19), результаты которых представлены на рис.3-4. На рис.3 представлено сравнение результатов расчета и моделирования вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал/помеха. Анализ показывает высокую степень соответствия результатов расчета и компьютерного моделирования.



На рис.4 представлен сравнительный анализ зависимости вероятности правильного обнаружения при фиксированной вероятности ложной тревоги полигауссового и корреляционного алгоритмов приема сигналов от отношения сигнал/помеха

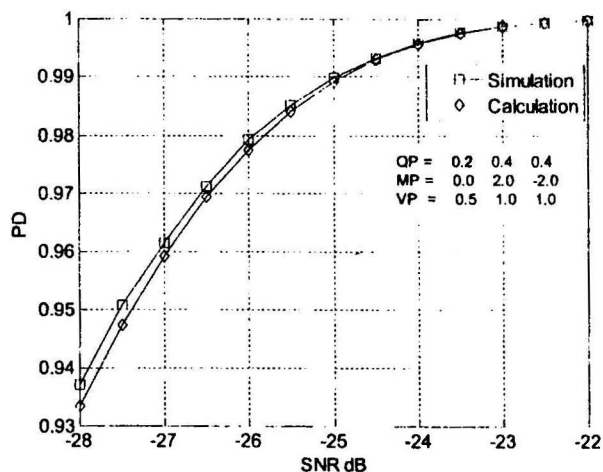


Рис.3. Сравнение результатов расчета и моделирования вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал/помеха

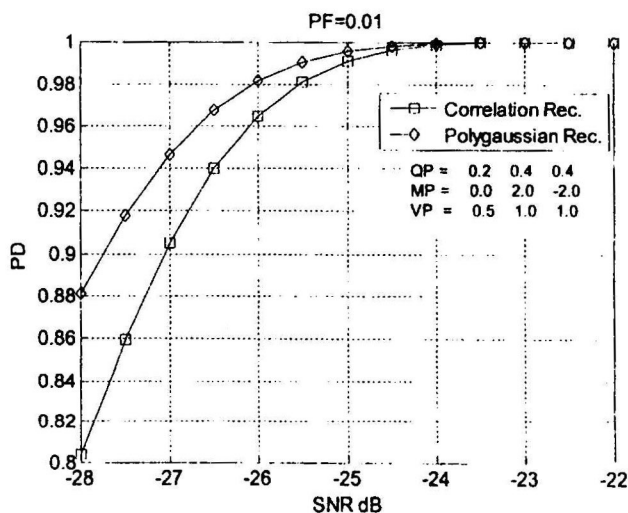


Рис.4. Сравнительный анализ вероятности правильного обнаружения при фиксированной вероятности ложной тревоги

Из графиков видно, что полигауссов алгоритм обеспечивает существенный выигрыш по вероятности правильного приема по отношению к корреляционному алгоритму приема при действии негауссовских помех.

**В главе 3** «Разработка полигауссовых алгоритмов поиска широкополосных сигналов на фоне негауссовских помех» осуществлен анализ и синтез помехоустойчивых алгоритмов поиска широкополосных сигналов на фоне негауссовских помех, разработаны компьютерные программы по расчету характеристик алгоритмов поиска широкополосных сигналов на фоне негауссовских помех, разработаны рекомендации по практической реализации предлагаемых алгоритмов обработки и поиска широкополосных сигналов, рассмотрены вопросы преодоления априорной неопределенности.

При организации поиска диапазон возможных значений параметра широкополосного сигнала  $\alpha(t)$  разбивается на некоторое число ( $L$ ) интервалов (элементов разрешения). Размер каждого из них определяется точностью, с которой должен быть определен параметр  $\alpha(t)$  в процессе поиска. Это точность зависит от максимального значения рассогласования, которое может быть отработано следящей системой синхронизации при переходе от режима поиска к режиму слежения.

Предложен алгоритм поиска широкополосных DS/SS сигналов сочетающий поликорреляционное обнаружение сигнала на интервале анализа  $T_d$  и последовательную стратегию циклического поиска. Циклический поиск заключается в последовательном просмотре всех элементов области неопределенности и фиксации из них тех, в которых происходит обнаружение сигнала поликорреляционным обнаружителем (рис.5).



Рис.5

В поликорреляционном обнаружителе на интервале времени  $T_a$  осуществляется поликорреляционная обработка принимаемого сигнала и опорного сигнала в некотором элементе разрешения (некоторое значение параметра  $\alpha(t) = \alpha_i$ ), и решающая статистика  $L(\bar{u})$  сравнивается с порогом  $\lambda_0$ . Если превышение порога  $\lambda_0$  отсутствует (решение об отсутствии сигнала в данном элементе разрешения), то поиск продолжается в прежнем направлении, и система переходит к анализу следующего элемента разрешения. Если превышение порога  $\lambda_0$  существует, то выносится решение о наличии сигнала в данном элементе разрешения, поэтому поиск прекращается, и система переходит к выполнению последующих действий. При пропуске сигнала во всех элементах разрешения система приступает к очередному циклу поиска.

На основе теории графов определяются вероятность успешного поиска

$$P_s = H(0) = \frac{P_D [1 - (1 - P_F)^L]}{LP_F [1 - (1 - P_D)(1 - P_F)^{L-1}]}, \quad (25)$$

и математическое ожидание времени поиска:

$$T_s = m_1 \{T\} = - \frac{d}{ds} \frac{H(S)}{H(0)} \Big|_{s=0} = LT_a \left[ \frac{1}{(1 - P_F)^L - 1} + \frac{1}{LP_F} + \frac{1}{1 - (1 - P_D)(1 - P_F)^{L-1}} \right], \quad (26)$$

где:  $P_D$  и  $P_F$  – вероятности правильного обнаружения и пропуска, соответственно, которые для рассматриваемого типа поликорреляционного обнаружителя определяются по методу, разработанному в главе 2.

Произведена оптимизацию параметров поликорреляционного обнаружителя – порога обнаружения  $\lambda_0$ , интервала анализа  $T_a$  входящих в состав системы поиска на основе критерия минимума среднего времени поиска  $T_s$  при данной финальной вероятности успешного завершения поиска  $P_s = P_0$ .

$$\{\lambda_0^{op}, T_a^{op}\} = \arg \min_{\lambda_0, T_a} T_s(\lambda_0, T_a), \quad (27)$$

$P_s(\lambda_0, T_a) = P_0$

В силу сложности выражений для  $P_F$  и  $P_D$  указанная задача решается численными методами на основе алгоритма Деккера.

На рис.6 представлены зависимости нормированного среднего времени успешного завершения поиска от отношения сигнал/помеха для предлагаемого поликорреляционного и известного корреляционного алгоритмов поиска.

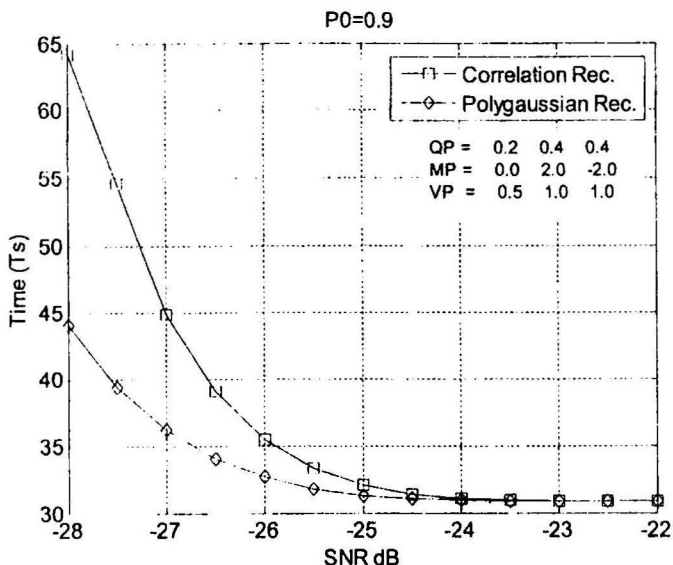


Рис.6.Результаты оптимизации параметров процедуры поиска синхросигнала

Результаты анализа показывают, что предложенный поликорреляционный алгоритм поиска позволяет существенно уменьшить среднее время поиска особенно при малых отношениях сигнал/помеха.

Рассмотрены вопросы практической реализации предлагаемых алгоритмов обработки и поиска DS/SS сигналов.

**В заключении** представлены основные результаты и выводы по диссертации. Основные результаты и краткие выводы:

- Разработан метод анализа распределений решающей статистики полигауссовых алгоритмов приема на фоне негуссовских помех, обеспечивающий приближенное определения параметров результирующего полилогнормального распределения решающей статистики полигауссовых алгоритмов обработки сигналов;
- Синтезирован помехоустойчивый алгоритм обнаружения сигналов со случайной начальной фазой на фоне негауссовских помех;
- Разработана методика аналитической оценки и получены замкнутые выражения для оценки вероятности ошибки полигауссового алгоритма различения сигналов известной формы на фоне негауссовских помех;
- Разработана методика аналитической оценки и получены замкнутые выражения для оценки вероятностных характеристик полигауссового

алгоритма обнаружения сигналов со случайной начальной фазой на фоне негауссовских помех;

- Разработан алгоритм поиска широкополосных сигналов на фоне негауссовских помех, осуществлен анализ эффективности и синтез параметров алгоритма по критерию минимума времени поиска при фиксированной вероятности успешного завершения поиска.
- Разработаны компьютерные программы по моделированию и расчету характеристик алгоритмов обработки и поиска широкополосных сигналов на фоне негауссовских помех;
- Разработано устройство поиска широкополосных сигналов, рекомендации по практической реализации разработанных алгоритмов обработки и поиска широкополосных сигналов.

### Публикации

1. Алхамад А.М., Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М. Анализ помехоустойчивости обработки широкополосных сигналов со случайной фазой при воздействии негауссовских помех// Нелинейный мир. 2010.Т. 8. №5. С.335-341. (Журнал из Перечня ВАК).
2. Ефимов Е.Н., Алхамад А.М. Повышение помехоустойчивости систем беспроводной связи на основе адаптивного поликорреляционного алгоритма обработки сигналов// Нелинейный мир. 2010.Т. 8. №6. С.384-389. (Журнал из Перечня ВАК).
3. Алхамад А.М., Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М. Анализ помехоустойчивости полигауссового алгоритма различения сигналов известной формы на фоне негауссовских помех //Вестник Казанского государственного технического университета им.А.Н.Туполева. 2010.№2.С.62-65. (Журнал из Перечня ВАК).
4. Алхамад А. М.Помехоустойчивый алгоритм поиска синхросигналов на фоне негауссовских помех//Вестник Казанского государственного технического университета им.А.Н.Туполева. 2010.№2.С. 66-68.(Журнал из Перечня ВАК).
5. Аднан А.М., Чабдаров Ш.М., Надеев А.Ф., Файзуллин Р.Р., Ефимов Е.Н. Поликорреляционная распределенная адаптивная обработка сигналов на фоне негауссовских помех// Нелинейный мир. 2009.№3. С. (Журнал из Перечня ВАК).
6. Аднан А.М., Чабдаров Ш.М., Щербаков Г.И., Надеев А.Ф., Файзуллин Р.Р., Ефимов Е.Н. Поликорреляционный адаптивный алгоритм различения сигналов на фоне негауссовских помех //В сборнике трудов XV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж. 2009 .С.73-79.
7. Алхамад А. М., Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Щербаков Г.И.Метод анализа помехоустойчивости полигауссового алгоритма различения сигналов на фоне негауссовских помех // В сборнике трудов XVI Меж-

- дународной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж. 2010.С.61-66.
8. Аднан А.М., Чабдаров Ш.М., Надеев А.Ф., Ефимов Е.Н. Адаптивная обработка сигналов на фоне негауссовских помех// Тезисы доклада на VI Всероссийскую научно-практическую конференцию «Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем». Ульяновск. 2009.г.С.153.
  9. Алхамад А. М.Алгоритм поиска синхросигналов на фоне негауссовских помех//Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике.Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции. Издательство Чувашского университета. 2010. С.207-209.
  - 10.Алхамад А. М., Надеев А.Ф.Анализ помехоустойчивости полигауссового приема сигналов на фоне негауссовских помех//Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике. Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции. Издательство Чувашского университета. 2010. С.205-207.
  - 11.Аднан А.М.Метод Анализа помехоустойчивости алгоритмов обработки синхросигналов на фоне негауссовских помех//Сборник материалов Десятой Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций». Самара. 2009.С.89-90.
  - 12.Чабдаров Ш.М., Надеев А.Ф., Ефимов Е.Н., Аднан А.М. Синтез алгоритма адаптивной обработки сигналов при воздействии негауссовских помех// Сборник материалов Десятой Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций». Самара. 2009.С.102-103.
  - 13.Алхамад А. М., Надеев А.Ф. Алгоритм поиска синхросигналов на фоне негауссовских помех// Сборник материалов Международной НТК «ТрансТелеКом» 2010.С.43-44.
  - 14.Алхамад А. М., Надеев А.Ф. Метод анализа помехоустойчивости полигауссового приема сигналов на фоне негауссовских помех// Сборник материалов Международной НТК «ТрансТелеКом 2010». С.45-47.

---

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Печ.л. 1,0. Усл.печ.л. 0,93. Уч.-изд.л. 0,97.  
Тираж 100. Заказ № 146

---

Типография Издательства Казанского государственного  
технического университета  
420111, Казань, К. Маркса, 10

